

博士論文概要

[課程博士一覧]

Wang Yanran	Formation Control of Swarm in Two-dimensional Manifold: Analysis and Experiment 二次元多様体における群形成の制御：解析と実験	令和6年3月25日授与
高 山 創	Digital Active Gate Drive System for Silicon Carbide Power MOSFETs シリコンカーバイドパワー MOSFET のためのデジタルアクティブゲート駆動システム	令和6年3月25日授与
長 嶺 英 朗	Study on error estimation of the Cauer ladder network method カウア回路法の誤差推定に関する研究	令和6年3月25日授与
飛 田 美 和	Theoretical Study on the Nonlinear Model Order Reduction Method and Its Application to Motor Analysis 非線形モデル縮約法の理論的研究とモータ解析への応用	令和6年3月25日授与
西 嶋 泰 樹	Study on nonlinear transport and optical phenomena under inversion symmetry breaking 反転対称性の破れた系における非線形輸送と光学現象に関する研究	令和6年3月25日授与
原 征 大	High-Field Transport at Heavily-Doped SiC Schottky Contacts and Formation of Non-Alloyed Ohmic Contacts 高濃度ドーパ SiC ショットキー接合における高電界輸送および非合金化オーミック接合の形成	令和6年3月25日授与
大 村 和 正	Studies on Data-Driven Discourse Relation Recognition toward Natural Language Understanding 自然言語理解に向けたデータ駆動の談話関係認識に関する研究	令和6年3月25日授与
児 玉 貴 志	Advancing Dialogue Systems through Corpus Construction Focusing on User Internal States and External Knowledge ユーザ内部状態と外部知識に着目したコーパス構築による対話システムの高度化	令和6年3月25日授与
Haiyue Song	Studies on Subword-based Low-Resource Neural Machine Translation: Segmentation, Encoding, and Decoding サブワードに基づく低資源ニューラル機械翻訳に関する研究：分割、符号化、及び復号化	令和6年3月25日授与
Zhuoyuan Mao	Breaking Language Barriers: Enhancing Multilingual Representation for Sentence Alignment and Translation 言語の壁を超える：文のアラインメントと翻訳のための多言語表現の改善	令和6年3月25日授与

山下 浩平	Reflectance Maps for Non-Lambertian 3D Reconstruction 反射マップを用いた非ランバート面の3次元形状復元	令和6年3月25日授与
森 聖太	In-Band Full-Duplex Transmission for Next Generation Mobile Communication 次世代移動通信システムにおける帯域内全二重通信	令和6年3月25日授与
牧 野 仁 宣	Wide-area broadband private wireless communication system 広域広帯域自営無線通信システム	令和6年3月25日授与
康 瑞	Fault-Resilient Resource Allocation in Network Function Virtualization ネットワーク仮想化における故障耐性のある資源割り当て	令和5年9月25日授与
朱 夢 菲	Resource Allocation in Network Function Virtualization with Workload-Dependent Unavailability 負荷依存の不可用性を伴うネットワーク機能仮想化における資源割り当て	令和6年5月23日授与
竹 田 健 太	Lightpath Provisioning in Elastic Optical Networks エラスティック光ネットワークにおける光パス設定	令和6年3月25日授与
大 島 國 弘	Leakage-Current-Aware Layout Design of DNTT-Based OTFTs and Its Applications to Digital Circuits DNTTを用いる有機薄膜トランジスタのリーク電流考慮レイアウト設計とそのデジタル回路への応用	令和6年3月25日授与
竹 内 浩 造	A study on heavy ion-induced single event effects for radiation-tolerant FPGA development 耐放射線性FPGAに向けた重粒子誘起シングルイベント効果の研究	令和6年9月24日授与
程 全	Design and Reliability Analysis of System-on-Chips for Artificial Intelligence Applications at the Edge エッジ人工知能アプリケーション向けのシステムオンチップの設計と信頼性解析	令和6年9月24日授与
片 山 梨 沙	Computational Modelling and Neural Mechanisms of Hierarchical Inference and Decision-making in Partially-observable Environments 部分観測環境における階層的推論・意思決定過程のモデル化とその神経基盤に関する研究	令和6年9月24日授与
岩 田 晃 拓	ヘリオトロンJにおける近赤外領域の分光診断に関する研究	令和6年3月25日授与
Kim Heejun	Exploring the Optical Properties of Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides Moiré Superlattice 二次元遷移金属ダイカルコゲナイドのモアレ超格子の光学特性の探索	令和6年5月23日授与

滝	朋 恵	Study on the plasma waves observed by single spacecraft interferometry in the terrestrial inner magnetosphere 地球内部磁気圏において単一衛星による干渉法で観測されたプラズマ波動に関する研究	令和6年9月24日授与
張	天	Study on Impacts of Geomagnetic Disturbances on Power Systems 地磁気擾乱による電力系統への影響に関する研究	令和6年9月24日授与
河 合	勝 己	Novel Rectenna Design Methods for Wireless Power Transfer Systems 無線電力伝送システムに向けた新しいレクテナ設計手法に関する研究	令和6年9月24日授与
中 本	成 洋	Novel Architectures and an Efficient Calibration Technique for Low-cost and High-performance Phased Array Antennas フェーズドアレーアンテナの低コスト化と高性能化に向けた新技術の開発	令和6年9月24日授与

Wang Yanran (引原隆士 教授)

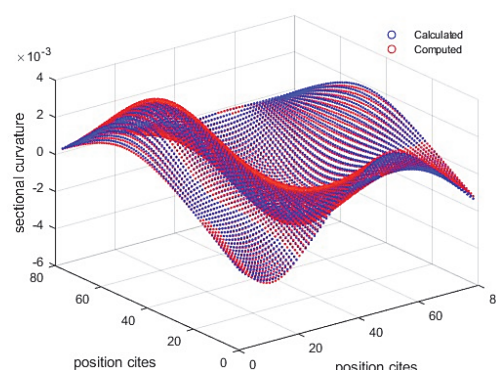
「Formation Control of Swarm in Two-dimensional Manifold: Analysis and Experiment」
(二次元多様体における群形成の制御：解析と実験)

令和6年3月25日授与

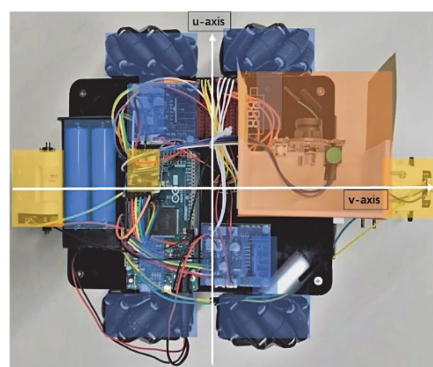
My research delves into the intricate interplay between Wireless Sensor Networks (WSNs) and Swarm Intelligence (SI), investigating their confluence.

WSNs have gained considerable attention due to their ability to provide pervasive situational awareness, finding applications across diverse domains such as structural health monitoring and habitat surveillance, among others. Nevertheless, WSNs frequently encounter energy constraints, particularly in challenging environments. In response, the concept of clustering has emerged as a pivotal technique for devising energy-efficient algorithms.

While existing WSN clustering algorithms have predominantly focused on protocol enhancements to accommodate scalability, fault tolerance, and data aggregation, this thesis introduces a fresh perspective. Drawing inspiration from the realm of Swarm Intelligence (SI), where simple agents collectively manifest intricate behaviors, it advocates for a paradigm shift. Specifically, my research proposes the analysis of evolving swarm formations as a mechanism to extract pertinent environmental insights, thereby mitigating energy-intensive data transmission and obviating the dependence on a central Base Station (BS). The central notion revolves around conceptualizing the external environment as an $(n - 1)$ -dimensional Riemannian manifold, defined by the solutions to the equation $F(x_1, \dots, x_n) = 0$, where F is a C^∞ function. By observing the change in swarm formation within the manifold, using the geodesic deviation equation, we can estimate the curvature of the manifold, providing valuable information about the external potential. The figure on the right exemplifies the algorithm's efficacy in estimating curvature on an unknown manifold through swarm formations. Red denotes the algorithm's estimated curvature, while blue represents the actual curvature.



Furthermore, my research addresses swarm formation control within the Riemannian manifold M . This formation control problem is reframed as a trajectory estimation issue, encapsulated within a leader-follower framework. The research leverages Koopman operator theory and Extended Dynamic Mode Decomposition (EDMD) techniques to predict follower trajectories and offer guidance to the followers, leading to enhanced formation control efficiency.



Additionally, my research validates theoretical formulations through practical experiments involving mobile robots. Figure on the left show robots used for experiment. By bridging theoretical constructs with tangible empirical results, this research contributes to the advancement of formation control strategies.

高山 創 (引原隆士 教授)

「Digital Active Gate Drive System for Silicon Carbide Power MOSFETs」

(シリコンカーバイドパワー MOSFET のためのデジタルアクティブゲート駆動システム)

令和6年3月25日授与

電力を所望の形へと変換する機能を担う電力変換回路において、その性能を左右するのが、大きな電圧・電流のオン・オフを切り替えるパワー半導体素子である。近年、次世代半導体素子として期待されてきた炭化ケイ素 (SiC) パワー素子の研究開発および実用化が進展し、その優れた電氣的・熱的特性を活かした電力変換回路の高性能化が期待されている。一方で、その高速なスイッチング動作が誘起するノイズやサージ等が性能向上の妨げとなっている。それらを抑制しつつ、SiC 素子の優れた特性を使いこなす回路技術の開発が求められている。

そこで着目されているのが、アクティブゲート駆動 (AGD) 技術である。AGD は、パワー素子を駆動する IC であるゲートドライバの出力を数ナノ秒単位で調整することで、電流や電圧の変化速度やタイミング等を制御し、所望の特性を得る技術である。その有効性は多くの研究において実証されている一方で、回路設計の複雑さ故に、高度なノウハウや多大な設計労力なしには最適な動作を得ることが難しく、技術の汎用性に課題を残していた。

本研究では、ゲート駆動回路の設計プロセスを、設計者によるアナログな回路調整からソフトウェアによるデジタル最適化へと変換した、デジタルアクティブゲート駆動 (DAGD) システムを開発した。ゲート駆動技術をデジタル化することで、SiC 素子の実回路応用における諸課題への対応を容易に実現することを目指した。

本研究ではまず、DAGD システムのハードウェアとなる回路構成を検証した。信号領域で用いられるデジタル・アナログ変換技術に着想を得て、その原理をゲート駆動回路へと応用した DAGD を開発した (図1,2)。同回路は、従来のような1/0の2状態での制御ではなく、ゲート電圧の波形を時系列データとして扱うことで、AGD 動作の調整を組み合わせ最適化問題として解くことを可能にした。同回路によって、SiC MOSFET のスイッチングの過渡状態を操作し、サージ電圧や損失といった観点でスイッチング特性を改善できることを示した。

次に、DAGD の動作を最適化するソフトウェアとして、メタヒューリスティクスの一つである遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた最適化システムを開発した。SiC パワー素子の駆動波形を遺伝子表現し、所望の目的関数を最小化するような各変数の組み合わせを探索することで、様々な条件下で最適な駆動波形が得られることを確認した (図3)。汎用なハードウェアを使用し、動作の変更をすべてソフトウェアが担当することで、デバイス特性などを考慮したゲート駆動回路の個別設計というプロセスを排除し、個人のノウハウや設計労力に頼らずに SiC 素子の特性を引き出すことを可能にした。

さらに、素子のばらつきや劣化など、事前の予測が困難な不確かさを有する要因による回路動作不良に対して、DAGD システムの有効性を検証した。素子の特性ばらつきに由来する素子間での電気ストレスの不均衡や、長期使用時の素子劣化による特性変化に対して、素子毎のスイッチング動作を調整することで、電力変換回路としての性能を維持・向上できることを実証した。

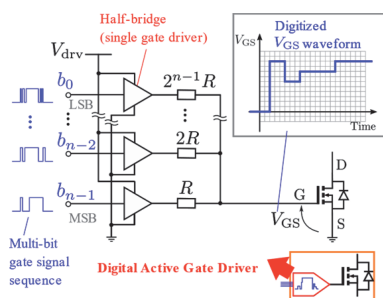


図1 DAGD の回路構成

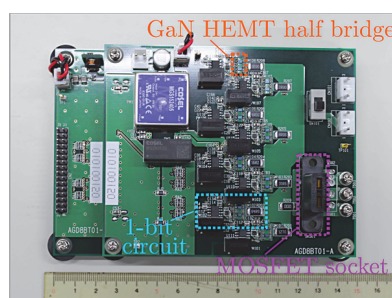


図2 開発した DAGD の写真

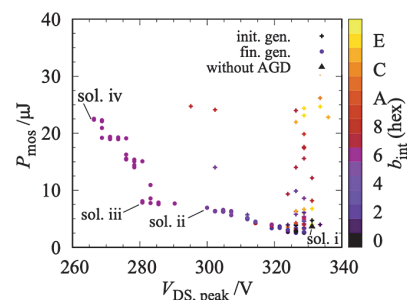


図3 GAによるSiC MOSFETのスイッチング動作の最適化

長 嶺 英 朗 (松尾哲司 教授)

「Study on error estimation of the Cauer ladder network method」

(カウア回路法の誤差推定に関する研究)

令和6年3月25日授与

電磁界シミュレーションは、近年の電気機器開発における重要な役割を担っている。多彩な運転条件に対応した電気自動車用モータなど、高度な設計が求められる領域において、有限要素解析による電磁界計算は、設計案を高速に検証するために必須のツールとなっている。しかし、多彩な運転条件の評価には有限要素解析を各条件について実行する必要があるため、解析時間が膨大となるため、計算の高速化が望まれる。

計算に時間のかかる問題を直接解く代わりに、より計算しやすい代理の問題に置き換えて解く近似手法が多数研究されており、これらはモデル縮約法と呼ばれる。本研究は、交流解析向けのモデル縮約法のひとつである Cauer ladder network (CLN) 法を主題とする。CLN 法は、一般形状領域における電磁界の方程式を、はしご形の等価回路 (図1) の回路方程式に置き換えて解くものである。はしご回路の初段は直流成分に対応し、交流の影響は後ろの段に現れる。事前計算によって一度等価回路を構成すれば、各運転条件での計算や制御回路との連成解析、時間発展計算等は回路シミュレーションで置き換えることができ、計算時間の削減につながる。

CLN 法では、はしご回路の段数が精度に影響を及ぼす。CLN 法の段数と計算精度の関係については、これまで数理的・数値実験的アプローチから検討が行われてきたが、明らかでない点も依然として多く残されていた。等価回路の事前計算には、段数と同じだけの有限要素解析が必要になるため、これは計算コストと計算精度の関係とも言い換えられる。所望の精度で解析を行うには、近似特性は重要な問題である。

本研究では、CLN 法の近似特性を明らかにし、低コスト・高精度を両立した電磁界計算を実現することを目的として、数理的アプローチから CLN 法の誤差に関する検討を行った。得られた成果は次の通りである。

- ① 線形作用素の観点から CLN 法の再定式化を行った。CLN 法では有限要素解析を繰り返し実行することで等価回路を生成するが、これは積分作用素を繰り返しかける操作とみなせる。この積分作用素の固有スペクトルに着目することで、基底関数の生成が直交多項式の生成と対応することを見出した。また、この定式化に基づいて、直交多項式の計算によって近似解の誤差評価を行う手法を開発した。
- ② 連分数の一般論における誤差評価法を CLN 法に応用した誤差評価手法を提案した。はしご回路のインピーダンスは連分数によって与えられる。連分数から抽出した複素関数の値域に対して平面幾何学的考察を行うことで、連分数の真値の存在範囲を容易に計算することができる。類似する手法として、近似インピーダンス同士の差によって CLN 法の精度を推定する手法が以前より用いられていたが、本研究はこれに理論的根拠を与えるものである。
- ③ マルチポート CLN 法の誤差に関する回路理論的検討を行った。通常の (シングルポート) CLN 法は、単一入力単一出力系を (スカラー値) 連分数で近似する。これを拡張したマルチポート CLN 法は、三相機器などの多入力多出力系を行列値連分数によって近似するものである。マルチポート回路におけるテブナン・ノートンの定理を用いることで、行列値連分数に関する新しい誤差公式を得た。

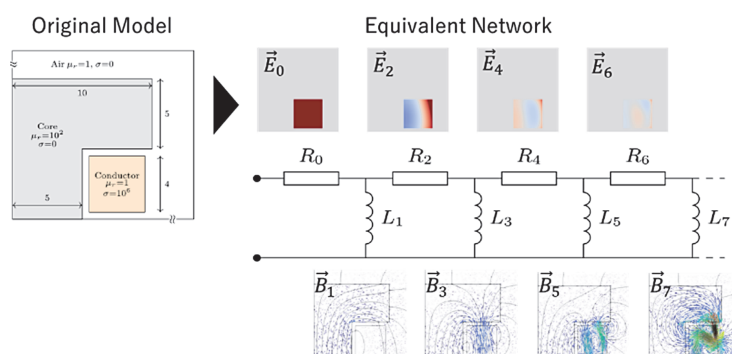


図1. Cauer ladder network 法による等価回路の生成

以上のように、本研究では、CLN 法に関するこれまでの知見を数理的アプローチからより深めるとともに、近似精度の推定手法の開発を行った。

飛 田 美 和 (松尾哲司 教授)

「Theoretical Study on the Nonlinear Model Order Reduction Method and Its Application to Motor Analysis」

(非線形モデル縮約法の理論的研究とモータ解析への応用)

令和 6 年 3 月 25 日授与

自動車の電動化や産業の自動化を進めていくにあたり、主動力源としてのモータへの期待は大きい。同時に、資源の偏在の観点から、誘導機 (IM) や可変リラクタンス (VR) 型ステッピングモータなど、レアアースを必要としないモータの設計とその制御技術の発展が、一層求められている。渦電流界解析を援用した制御システム設計の実現が強く望まれるが、既存の解析手法では計算時間の面で困難であった。計算精度を保ったまま、計算時間を削減する手法として、モデル縮約法 (MOR) が精力的に研究されてきた。また、モータ特性を精度よく解析するためには、鉄心材料の非線形磁気特性を考慮することが必須であり、これを取り込んだ非線形 MOR 法の検討が進められている。

しかし、非線形性によりモータ挙動が多様化するため、想定される全運転状態を表現できる縮約モデルを生成するのは困難であった。特に、インバータにより生成された高周波成分を含む入力や、非一様なモータ構造に起因する空間調波成分を考慮した上で、渦電流界を幅広い運転条件 (入力周波数および振幅、IM の滑り、VR ステッピングモータの負荷角) で精度よく解析できる非線形 MOR 法は、今まで実現が困難であった。

そこで本論文では、非線形 MOR 法を確立し、IM・VR ステッピングモータの渦電流界解析に適用した。

特に、2017 年に開発された比較的新しい MOR 法であるカウアーラダー回路 (CLN) 法を非線形化するための理論検討を行った。また、提案手法を IM および VR ステッピングモータの解析に適用し、幅広い運転条件 (滑り、電源の周波数と振幅、同期・非同期など) で FEM の結果を良く再現することを確認した。また、計算速度は、IM 解析と VR ステッピングモータ解析でそれぞれ 4.1 倍、および 19.5 倍となった。時間ステップ数が大きいほど時間削減効果が高く、特にステップ数が膨大となる制御連成解析で威力を発揮することが期待される。

提案手法は、渦電流が大きな影響を与える場合でも、IM・VR ステッピングモータの最適制御を探索するためのビヘイビアモデルを構成する有力な手段である。したがって、資源の有限性に束縛されない、多様なニーズに合ったモータシステム開発に寄与することが期待される。

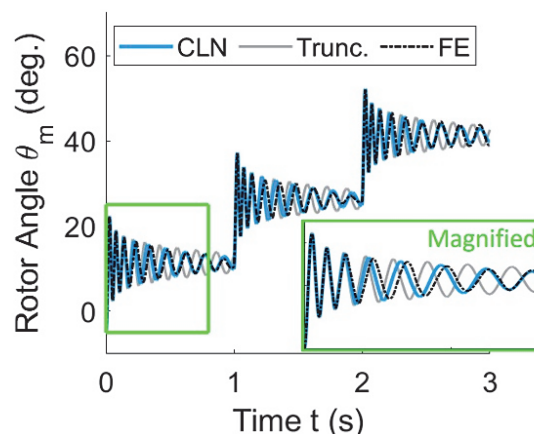


図 1 VR ステッピングモータにステップ入力を与えたときの回転子角度の時間変化。提案手法 (CLN) により、有限要素法 (FE) とほぼ同じ結果が得られたことが分かる。計算時間は有限要素法と比較し、約 20 分の 1 となった。

西 嶋 泰 樹 (白石誠司 教授)

「Study on nonlinear transport and optical phenomena under inversion symmetry breaking」

(反転対称性の破れた系における非線形輸送と光学現象に関する研究)

令和 6 年 3 月 25 日授与

反転対称性の破れは、長年に渡り固体物理における重要なトピックである。空間反転対称性の破れに起因する現象として、非線形現象があげられる。対称性の破れにより 2 次の非線形輸送が許容され、非相反伝導、非線形ホール効果、光電流の生成などが生じる。これらの現象は、対称性の破れに基づく整流効果であり、発電機構やメモリ機構として新規デバイスの創生が期待できる。これまでの非線形現象についての古典的な解釈は、近年では量子力学的な理解へと拡張され、電子状態の幾何学的性質やトポロジーなどの量子力学的性質との関連が徐々に明らかにされてきた。それに伴い、非線形現象そのものの理解だけでなく、量子力学的性質を探索する指針としての非線形現象の有用性が着目されている。

本研究では電子のスピンと電荷の相互変換において重要な材料群である、トポロジカル結晶絶縁体やポストグラフェン材料などの新規材料と従来材料である単体非磁性金属を対象として、非線形輸送現象を介した材料探索及びスピンと電荷の相互変換の観測を行った。さらに、反転対称性の破れやスピン蓄積の向きの制御による非線形現象の操作についても実証した。以下にその成果を示す。

1. トポロジカル結晶絶縁体におけるベリー曲率双極子に由来する非線形ホール効果とその制御に関する実験を行い、トポロジカル結晶絶縁体である $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ の非線形ホール効果の室温での観測に成功した。対照実験材料として同じ結晶構造を持つ材料でトポロジカルな性質を持たない PbTe でも同様の実験を行い、トポロジカルな性質と実験結果の関連について議論した。さらに強誘電性に基づく分極を制御することによるベリー曲率双極子と非線形ホール効果のスイッチングについてデモンストレーションを示した。実験結果に基づきベリー曲率双極子の大きさも計算した結果、低温では 130 nm 程度と、既存の他材料と比べても比較的大きな値を持つことが判明した。 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ のトポロジカルな電子状態を非線形輸送現象を介して明らかにし、その室温での制御を実現するに至った。
2. 対称性の破れた数原子層 Ge における円偏光ガルバノ効果の観測を行った。単原子層 Ge (ゲルマネン) はバククルしたハニカム構造を有する新規 2 次元材料であり、2 次元トポロジカル絶縁体である。円偏光ガルバノ効果は、非線形輸送現象である光電流生成の一種であるが、2 次元系ではラシュバ効果によるスピンと電荷の変換現象としても理解でき、2 次元系のスピン物性を探索する上で有効な手段である。光の照射角度を変化させた実験結果を比較し、ラシュバ効果と実験結果の対称性が一致していることを示した。また Ge 層の膜厚を変化させた対称実験から、ゲルマネン 2 層分に相当する膜厚において最も大きな円偏光由来の光電流が観測され、対称性の破れたゲルマネンにおける大きなラシュバ効果の存在を示唆する結果を得た。
3. 非磁性単体金属におけるスピン蓄積に由来する光電流を観測した。対称性の破れた系における直線偏光に誘起される光電流、linear injection current により、スピホール効果由来のスピン蓄積やエッジにおける対称性の破れの光学的な検出する手法を提案した。スピン蓄積やエッジ対称性の破れは、時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れた系で見られる linear injection current の観測において非常に重要な概念となる。まず、比較的大きなスピホール効果を有する基本的な単体金属である Pt において、光電流は Pt チャネルのエッジでのみ観測され、直線偏光と Pt チャネルエッジの相対的な角度にその符号が依存することをした。次にスピホール効果の符号が異なる W や面直方向に有限なスピン偏極を有する強磁性体膜での結果を比較し、光電流とスピン蓄積との関連性を明らかにした。さらに、スピホール効果が小さい軽金属である Cu での実験結果を示し、スピン蓄積したチャネルエッジにおける linear injection current が軽金属においてもスピホール効果由来の現象を観測する手法として有用である可能性を示した。

原 征 大 (木本恒暢 教授)

「High-Field Transport at Heavily-Doped SiC Schottky Contacts and Formation of Non-Alloyed Ohmic Contacts」

(高濃度ドーピング SiC ショットキー接合における高電界輸送および非合金化オーミック接合の形成)

令和 6 年 3 月 25 日授与

炭化珪素 (SiC) 半導体は、現行のシリコン (Si) を用いたパワーデバイスと比較して、電力変換時の導通損失を 1/500 程度に低減可能な新規半導体材料として注目を集めている。SiC パワーデバイスは既に量産化され、実システムにおいて顕著な省エネ効果を発揮している一方で、デバイス作製プロセスが十分に成熟しておらず、SiC デバイスのさらなる高性能化と作製コスト低減を妨げる要因となっている。SiC オーミック接合の低抵抗化および形成プロセスの簡略化は、そのような重要課題の一つである。

オーミック接合とは、半導体デバイスを外部回路に接続する役割を担う金属 / 半導体接合であり、十分に低い接触抵抗率 ($\rho_c < 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$) が要求される。しかし、SiC はバンドギャップが広く、典型的な電極金属を堆積したのみでは界面に高いエネルギー障壁が形成されるため、低い ρ_c を得るのが本質的に困難である。そこで、高濃度ドーピング SiC (ドーピング密度: $N_d > 10^{19} \text{cm}^{-3}$) 上に電極堆積後、高温熱処理 ($\sim 1000^\circ\text{C}$) を施すプロセスが業界標準となっている。一方、オーミック接合に関する先行研究の多くは、高温熱処理を前提とした現象論的なプロセス開発に留まっているため、高温熱処理によりオーミック接合が形成されるメカニズムは依然として理解されておらず、低抵抗化に向けた定量的な設計指針は皆無である。上記の問題を解決するには、高温熱処理を施さずに形成した金属 / 高濃度ドーピング SiC 非合金化界面における電気伝導機構を解明することが第一であり、その学術的理解に基づいて設計指針を提示することが不可欠である。

本研究ではまず、高濃度ドーピング SiC エピタキシャル成長層 (エピ層) 上に電極を形成し、その電流 - 電圧 (I - V) 特性の測定および解析を行った。高 N_d による非常に薄い障壁 ($\sim 10 \text{nm}$) と高電界 ($> \text{MV/cm}$) に着目し、一般的な熱電子放出 (TE) モデルではなく量子力学的トンネルが支配的となると考え、直接トンネル (DT) 電流の数値計算プログラムを実装した。本数値計算により、 I - V 特性の実験値を広範囲のドーピング密度・印加電圧に対して精度良く再現することに成功し、金属 / 高濃度ドーピング SiC エピ層界面の電気伝導が DT 電流に従うことを定量的に明らかにした。続いて、実デバイスのオーミック接合の多くが高濃度リン (P) イオン注入層上に形成されることを念頭に置き、P 注入 SiC 上電極の電気伝導機構を詳細に調べた。その結果、イオン注入層を用いた場合、ほぼ同濃度のエピ層を用いた場合と比較して、電流が数桁大きいことがわかった。界面障壁高さの詳細な解析を通じて、イオン注入層とエピ層で障壁の厚さがほぼ同一であることを確かめ、イオン注入 SiC 上電極での電流増大が、イオン注入誘起欠陥準位を介したトラップアシストトンネル (TAT) により説明できることを提案した。最後に、高濃度 P イオン注入 SiC 上に非合金化オーミック接合を形成し、その ρ_c を実験および DT 電流の数値計算により詳細に調べた。その結果、 N_d が 10^{19}cm^{-3} 台中盤以下のとき、 ρ_c の実験値が計算値と比較して数桁低いことを明らかにし、これが TAT の寄与により定量的に説明できると提案した。一方、 $N_d > 10^{20} \text{cm}^{-3}$ という超高濃度領域では、 ρ_c の実験値と計算値は非常によく一致し、DT 電流が支配的であることが明らかになった。特に、 $2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ という高濃度注入により、非加熱形成した Mg・Ti 電極において、 $1\text{--}2 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ という極めて低い ρ_c を達成した。 N_d の変化に伴う DT および TAT の寄与の変化を考慮した ρ_c 予測モデルを提案し、本モデルに基づいて、オーミック接合低抵抗化のための、障壁高さおよびドーピング密度に関する定量的な設計指針を提示した。

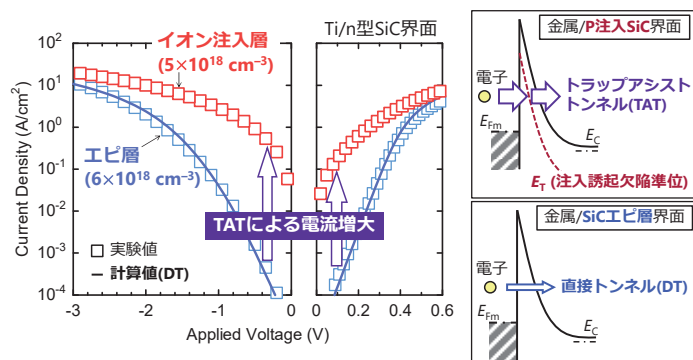


図 1: 金属 / 高濃度ドーピング SiC 界面における電流 - 電圧特性 (実験、計算) とトンネル電流の概念図。

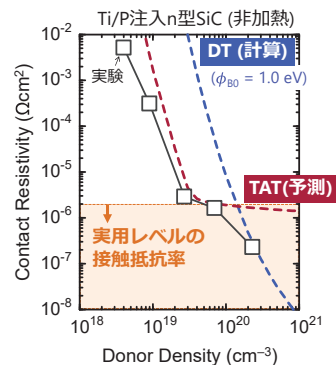


図 2: SiC 上非合金化オーミック接合における接触抵抗率のドーピング密度依存性。

大 村 和 正（黒橋禎夫 特定教授）

「Studies on Data-Driven Discourse Relation Recognition toward Natural Language Understanding」

（自然言語理解に向けたデータ駆動の談話関係認識に関する研究）

令和6年3月25日授与

自然言語処理における究極の目標として、人間と同等に自然言語を理解する計算機の実現がある。テキストは前後の文脈を考慮しつつ記述されるため、その意味を理解するためには、各言語単位（節や文など）の意味を理解するだけでなく、それらの間の繋がりも理解することが欠かせない。そのようなテキストスパン間の意味的な関係を談話関係と呼ぶ。談話関係は文章全体の意味を理解する上で重要なテキストの特性であり、幅広い応用可能性を持つことから、談話関係に焦点を当てた研究が長年取り組まれてきた。

しかし、談話関係の自動認識は言語を超えた実世界の知識を要することから積年の困難な問題である。近年、深層学習の目覚ましい発展により計算機の言語能力は大きく向上しているものの、談話関係の推論能力は依然として改善の余地があることが示されている。また、談話関係に焦点を当てた既往研究の問題点として、英語を主な対象に研究が進められてきたことが挙げられる。英語への偏重は、特に英語と言語類型論的に遠い日本語などの言語固有の現象が考慮されづらく、言語間での格差につながる可能性がある。このため、英語以外での検証を行うことも重要である。

このような背景から本研究では、（主に日本語の）テキスト中の談話関係を計算機によって推論する能力に焦点を当て、この改善に向けたデータ構築手法の開発に取り組んだ。また、関連する自然言語理解タスク及び教育分野への応用を通して談話関係の有用性を実証した。

具体的には、まず、主要な談話関係の一つである Contingency（蓋然的関係）に焦点を当て、基本的な蓋然的関係を問う多肢選択式問題（常識推論問題）の半自動的な生成手法を提案した。また、この提案手法を応用して常識推論問題を模した疑似問題を大規模に自動生成し、このデータ拡張による常識推論能力及び関連する自然言語理解タスクへの効果を検証した。次に、研究の焦点を蓋然的関係から談話関係全般に拡張し、談話関係認識の改善に向けた大規模言語モデルを用いた合成データの生成手法を提案した。最後に、「小学生は作文に苦手意識を持つ傾向がある」という日本語教育における積年の問題に着目し、この現状を改善するために、研究の過程で構築したデータを応用した小学生を対象とする作文学習アプリを設計・開発した。

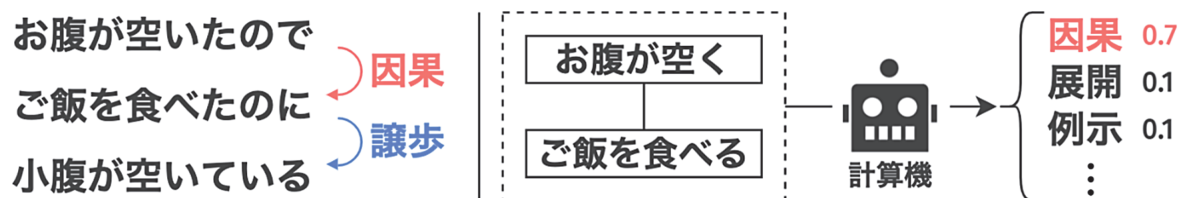


図1：テキスト中の談話関係（左図）と談話関係認識（右図）の例

児 玉 貴 志（黒橋禎夫 特定教授）

「Advancing Dialogue Systems through Corpus Construction Focusing on User Internal States and External Knowledge」

（ユーザ内部状態と外部知識に着目したコーパス構築による対話システムの高度化）

令和6年3月25日授与

対話システムは人間と自然言語を用いてコミュニケーションを取るシステムである。その実用性の高さから自然言語処理の研究分野でも関心が高い。近年ではニューラルネットワークを用いてエンドツーエンドの対話システムを構築する手法が主流となっている。具体的には、対話文脈を入力するとその対話文脈に続く応答を出力するようにニューラルネットワークを学習させる。この手法により、対話システムは柔軟で人間に近いレベルの応答が可能になりつつあるがまだ課題は残されている。

本論文では主に2つの課題に取り組む。1つ目はユーザ内部状態の理解である。システムの対話相手であるユーザがどういったことに知識があり、興味があるかを理解することでより優れた対話理解が得られる。先行研究ではこのユーザ内部状態を対話レベルで捉えることが多く、より詳細な追跡が必要であった。2つ目は外部知識の活用である。対話システムの外部に存在する情報源から情報を獲得することで、具体的かつ詳細な情報を提供できる。先行研究は外部知識の活用に注力するあまり、その元となる対話が実際の人間の対話よりも魅力に欠けるという課題があった。本論文ではこれら2つの課題に対して、コーパス構築に基づいた手法で取り組む。具体的には小規模かつ高品質な対話データを収集し、そのデータを用いて対話システムを改善する。

まず知識、興味、対話意欲の3つのユーザ内部状態を発話レベルで追跡する対話データセットを構築し、これらのユーザ内部状態をもとに、ルールベースで対話を管理する手法を提案した。次に、発話と外部知識が紐づいた対話データセットを構築し、そのデータセットを用いて、外部知識に基づいた対話応答生成手法を提案した。くわえて、その外部知識に基づいた対話応答の魅力度についても分析を行い、外部知識だけでなく、話者が元々持つ経験や知識が応答の魅力度において重要であることを明らかにした。最後に、ユーザ内部状態を発話より細かいエンティティ（名詞など）レベルで追跡する対話データセットを構築した。対話の話題に元々造詣が深い人を対話参加者としてより魅力的な対話収集を可能とした。さらに構築したデータセットにもとに、ユーザ内部状態と外部知識と統合的に活用する対話応答生成手法を提案した。

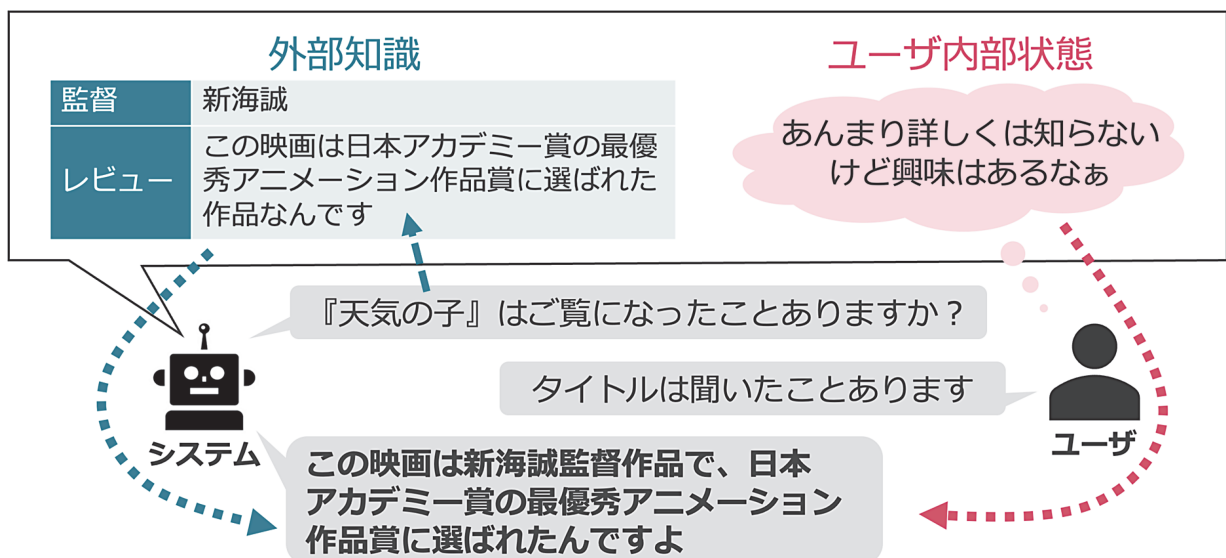


図1 ユーザ内部状態と外部知識を考慮した対話システムの例

Haiyue Song (黒橋禎夫 特定教授)

「Studies on Subword-based Low-Resource Neural Machine Translation: Segmentation, Encoding, and Decoding」

(サブワードに基づく低資源ニューラル機械翻訳に関する研究：分割、符号化、及び復号化)

令和6年3月25日授与

In a world rich with diverse ideas and cultures, humans are isolated into islands of distinct languages. Machine translation (MT) serves as a bridge, facilitating information access and cross-lingual communication. While neural machine translation (NMT) systems achieve near-human performance in high-resource languages, it is important to note that the majority of 7,100+ languages in the world are low-resource and have not benefitted significantly from the advancements in machine translation, leading to a substantial disparity among languages.

This thesis aims to improve the existing subword-based NMT systems to enhance the translation quality of low-resource language pairs. It begins with historical background of machine translation from rule-based systems to large language models. It then introduces the basics of subword-based NMT, including the motivation for using subwords, and the subword-based NMT model architecture.

Three challenges related to using subwords explored include 1) suboptimal subword segmentation, 2) ignoring multiple perspectives of one word during encoding, and 3) inaccurate word-probability estimation during decoding. This thesis proposed novel solutions to them: 1) linguistically motivated efficient neural subword segmenter, 2) exploiting diverse segmentations from multiple subword segmenters, and 3) merging the probabilities of segmentations that form the same word during decoding.

This thesis improves the performance of MT systems especially in low-resource scenarios by addressing three challenges related to subwords. The final chapter summarizes the thesis and outlines the possible directions for future work.

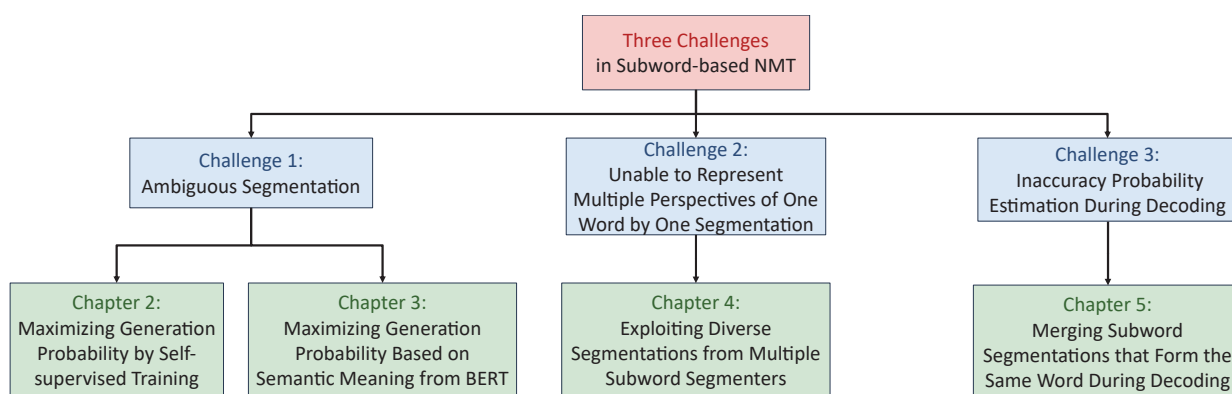


Figure 1: An overview of the three challenges and the proposed solutions included in this thesis.

Zhuoyuan Mao (黒橋禎夫 特定教授)

「Breaking Language Barriers: Enhancing Multilingual Representation for Sentence Alignment and Translation」

(言語の壁を超える：文のアラインメントと翻訳のための多言語表現の改善)

令和6年3月25日授与

This thesis embarks on a comprehensive exploration of multilingual representation learning, addressing the three identified challenges within this domain: (1) high computational demands, (2) data scarcity and (3) limitations in Transformer architecture, with a specific focus on sentence alignment and translation tasks. These tasks are essential in the broader context of multilingual NLP, enabling machines to understand and translate across diverse human languages with increased proficiency and efficiency.

To address the high computational demand accompanying the expansion of multilingual model language coverage, we proposed an efficient and effective multilingual sentence embedding (MSE) model, which employs cross-lingual token-level reconstruction and sentence-level contrastive learning as training objectives, allowing for efficient MSE model training with significantly less training data and computation. We also introduced a new knowledge distillation method for MSE models to streamline the inference process, successfully developing robust, low-dimensional MSE models for 109 languages.

To tackle the challenge of data scarcity in low-resource languages, this paper proposes new pre-training objectives for low-resource NMT. Specifically, to compensate for the lack of training data, we proposed phrase structure-based masked language modeling and reordering tasks. Additionally, we introduced word-level contrastive learning for low-resource NMT utilizing statistical word alignments, improving translation performance without requiring high-quality bilingual dictionaries. The new approach, AlignInstruct, was also introduced, enhancing translation accuracy in low-resource languages for large language models through word alignment-based instruction tuning.

To address the limitations in Transformer model architecture for zero-shot NMT, we initially proposed a new Transformer architecture that constructs interlingual representations on top of the Transformer encoder, significantly improving the performance for zero-shot NMT over conventional Transformer architectures. We also comprehensively examined the effects of layer normalization in zero-shot NMT, finding that post-layer normalization consistently outperforms pre-layer normalization, indicating the importance of post-layer normalization settings in zero-shot NMT regardless of the model configuration.

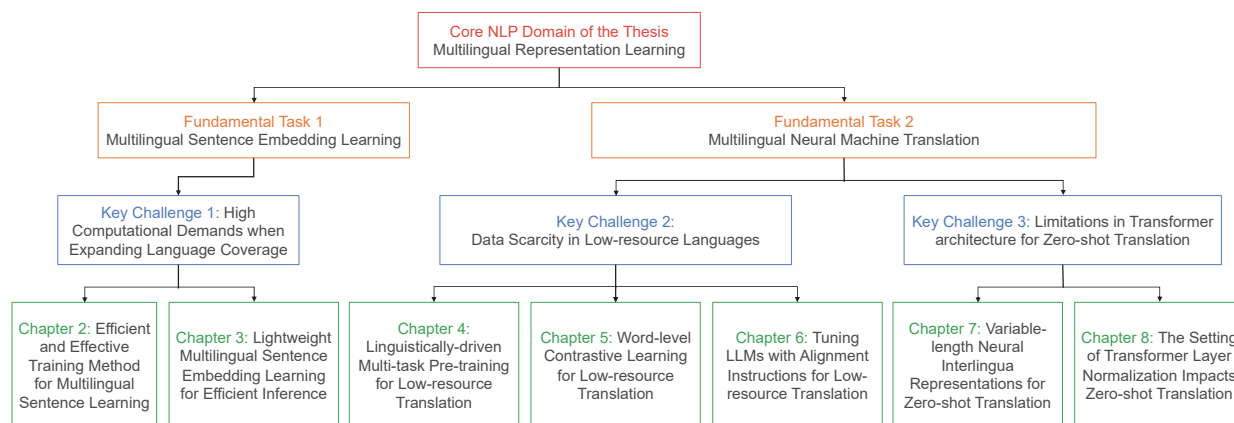


Figure 1: An overview of the three challenges and the proposed solutions included in this thesis.

山下 浩平 (西野恒 教授)

「Reflectance Maps for Non-Lambertian 3D Reconstruction」

(反射マップを用いた非ランバート面の3次元形状復元)

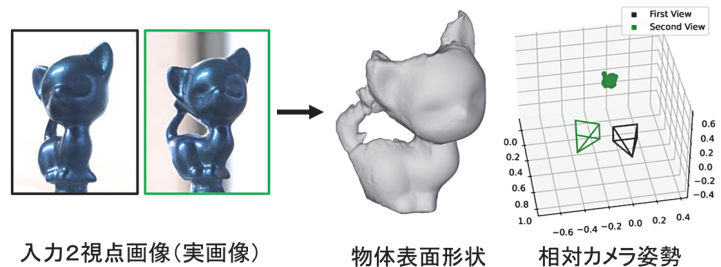
令和6年3月25日授与

カメラは安価で普遍化したセンサであり、日常の中でカメラを用いて撮影した数枚の画像から被写体の3次元形状を復元することができれば、安価で手軽な3次元認識技術としてロボティクスやコンピュータグラフィックスなど幅広い分野に応用することができる。これまでに、実世界、つまり未知の自然な光源環境の下での3次元形状復元は、異なる視点から撮影された画像間の画素の対応関係を検出し、対応関係と幾何的な拘束に基づいて被写体の形状をカメラ姿勢とともに推定することにより解かれてきた。このような手法は被写体の模様を対応関係の検出に利用する。しかし、実世界には模様のない物体が数多く存在するため、視点間の対応関係は常に得られるわけではない。特に、反射特性を理想的な拡散反射（ランバート反射）で近似できない物体（非ランバート面）の場合、具体的には、車やプラスチック製品など、鏡面反射による光沢がある物体の場合、同じ物体表面上の点であってもその見え方は視点により大きく変化するため、視点間の正確な対応関係を得ることは極めて困難となる。

本博士論文は模様やランバート反射を仮定しない多視点画像からの3次元形状復元という問題に着目し、その解法および評価用データセットの構築についてまとめたものである。模様のない非ランバート面を扱うために、本研究では被写体の見えと法線の光学的な関係を利用する。陰影や光沢などの見えから各画素の法線を推定し、法線を画素ごとの特徴量として視点間の対応関係の検出に用いることにより、見えが視点依存な非ランバート面についても正確に視点間の対応検出を行い、3次元形状を復元することが可能となる。また、本研究では従来対応検出における外乱として扱われてきた光沢に着目する。同一の光源により生じた光沢が存在する画素同士を対応付ける、新たな種類の対応関係を利用することにより、カメラ姿勢と物体形状の両方が未知の場合であっても両者を同時に解くことを可能とする。具体的には、本論文の貢献は以下のとおりである。

- (1) 画像・カメラ姿勢・物体形状等の組からなる合成画像・実画像データセットの構築を行い、模様のない非ランバート面の3次元形状復元に関する評価基盤の確立を行った。
- (2) 周囲の光源環境、物体の反射特性、およびカメラ姿勢が既知の場合について、見えから法線を推定し、法線を視点間の対応検出のための特徴量として用いる深層多視点3次元形状復元手法の提案を行った。光源環境と反射特性の情報から見え（輝度値）と法線の関係を表す反射マップを計算し、画像とともに深層ニューラルネットワークの入力として用いることにより、精緻な法線推定および3次元形状復元を実現した。
- (3) 反射マップを入力とした深層多視点形状復元および画像・法線マップを入力とした深層反射マップ推定を交互に行う、形状・反射マップの同時推定手法を提案した。これにより、光源環境や物体の反射特性の情報を必要としない、カメラ姿勢既知の多視点画像のみを入力とした非ランバート面の3次元形状復元を実現した。
- (4) 同一の光源により生じた光沢が存在する画素同士を対応付ける新たな種類の対応関係を利用する、物体形状・カメラ姿勢・反射マップの同時推定手法を提案した。カメラと物体の距離が離れている場合、解を一意に求めるためには新たな種類の対応関係が必要不可欠であることを示し、また、提案手法により、模様のない非ランバート面の画像のみを入力とした物体形状・カメラ姿勢の同時推定が実現されることを実証した（図1）。

以上本論文は、従来困難であった模様のない非ランバート面の疎な多視点画像からの3次元形状復元を初めて可能とし、合成画像および実画像データセットにおいてその有効性を実証したものである。



入力2視点画像(実画像)

物体表面形状

相対カメラ姿勢

図1：模様のない非ランバート面の3次元形状復元の一例

森 聖 太 (原田博司 教授)

「In-Band Full-Duplex Transmission for Next Generation Mobile Communication」
(次世代移動通信システムにおける帯域内全二重通信)

令和 6 年 3 月 25 日授与

移動通信システムが誕生して以来、通信トラヒックは急速に増大し続けており、これらのトラヒックを収容するため、第 5 世代移動通信 (5G) システムが 2020 年に商用展開された。しかし、様々なアプリケーションの進化や誕生に伴い、個人で利用する通信容量は増大し続けることが予想される。また、Internet of Things (IoT) システムは農学・医学・防災といった様々な分野において大きな役割を担いつつある。しかし、爆発的に増大する通信トラヒックを収容する新たな周波数資源は枯渇しており、周波数利用効率向上技術の開発が急務である。

周波数利用効率を向上する技術の候補の 1 つとして注目されているのが帯域内全二重通信 (In-Band Full-Duplex: IBFD) である。IBFD は上り (Uplink: UL) 通信と下り (Downlink: DL) 通信を同時かつ同一周波数で実行する複信方式であり、従来の半二重通信 (Half-Duplex: HD) と比較すると、理論的には周波数利用効率を 2 倍に向上可能である。従って、IBFD を導入したセルラ (Full-Duplex Cellular: FDC) システムの実現が期待されている。しかし、基地局 (Base Station: BS) の送信信号が自身の受信機に回り込み干渉する自己干渉 (Self-Interference: SI) や、UL 通信端末から DL 通信端末に干渉する端末間干渉 (Inter-User Interference: IUI) が通信品質や端末スケジューリング動作に重大な影響を与える。FDC 実現のためには、これらの干渉抑圧及び通信特性の開発が必須である。

5G システムをベースとして次世代移動通信システムが発展することを想定し、本研究は 5G システムにおける FDC システム (5G-FDC) の実現を目的とした。得られた成果は以下のとおりである。

1. 5G ベースディジタル SI キャンセラ (Digital SI Cancellation: D-SIC) を提案した。本手法では 5G の信号構成や通信路符号化手法を考慮しており、現行の 5G システムに直接導入が可能である。さらに、5G-FDC の実現可能性を実証するため、BS、UL 通信端末、DL 通信端末から構成される 5G-FDC 物理層プロトタイプをソフトウェア無線機 (Software-Defined Radio: SDR) を用いて開発し、提案 D-SIC を導入した。計算機シミュレーション及び実機実験により、IBFD 環境下でも提案 D-SIC の利用により UL 通信が可能となり、5G-FDC が実現可能であることを示した。
2. 逐次干渉キャンセラに基づく 5G ベース IUI キャンセラ (IUI Cancellation: IUI-C) を提案した。まず、簡単なモデルを用いた計算機シミュレーションにより、逐次干渉キャンセラを用いた IUI-C の有効性を示した。その後、5G の信号構成及び通信路符号化手法を考慮し、5G ベース D-SIC と共存可能な 5G ベース IUI-C を提案した。また、受信信号のみから IUI-C の利用有無を判断する手法も併せて提案した。また、IUI-C を導入した 5G-FDC システム全体の動作形態の 1 つを確立するため、端末スケジューリング及び適応変調アルゴリズムも併せて提案を行った。計算機シミュレーションを用いた評価により、ダイナミック FDC システムにおいて平均 UL スループットを最大 71.8% 向上できることを示した。
3. IBFD を含む様々な新技術の実システムへの導入及び検証に利用可能な、SDR ベース 5G 測定プラットフォームを開発した。本プラットフォームは 5G に関連する任意の送受信信号処理を導入可能である。本プラットフォームの利用例の 1 つとして、500 km/h 以上の高速移動環境下において利用可能な受信信号処理手法を提案し、実機実験を通じてその有効性を示した。
4. 屋外環境および屋内工場環境を想定したフィールドで取得した電波伝搬データをもとに、実フィールドにおける 5G-FDC の実現可能性及び有効性の範囲を示した。評価結果から、実フィールドへの IBFD 導入は実現可能であり、提案 IUI-C は UL スループット向上に効果的であることを示した。

以上、本論文は今後の多様な分野における新たなアプリケーションを支えるプラットフォームとして利用される、移動通信システムの周波数利用効率向上の一助になると考えられる。

牧 野 仁 宣 (原田博司 教授)

「Wide-area broadband private wireless communication system」

(広域広帯域自営無線通信システム)

令和 6 年 3 月 25 日授与

ICT を活用した多様なアプリケーションの普及により、無線通信の需要が増加している。従来の無線通信はモバイル端末と基地局が接続することが中心であったが、近年、M2M 通信や V2X 通信など、様々な形態での利用が増加している。これらの通信は、通信事業者が提供する公共無線通信（携帯電話等）とは異なり、利用者の用途に合わせた開発や、用途に合わせた標準規格に基づくシステム導入が行われるため、自営無線通信システムと呼ばれる。現在、狭域・狭帯域システムは検討されているが、広域・広帯域システムの検討は十分ではない。本論文は、公共公益および放送分野で必要となる広域広帯域自営無線通信システムの実現を目指している。

まず、第一の自営無線通信システムとして、VHF 帯を用いた広域システムである wireless regional area network (WRAN) を扱った。VHF 帯は、主に携帯電話で用いられる UHF 帯に比べて低い周波数帯であり、波長が長く電力減衰が低いため広域通信が可能であるが、周波数選択性フェージングが生じやすく、所望波に影響を与える。しかし、このフェージングの影響を軽減し、VHF 帯でも移動環境で高品質な伝送を実現するためのシステム検討が十分でなかった。そこで本論文では、直交周波数分割多元アクセス (OFDMA) 方式を利用した移動無線通信システム、特に受信方式を提案した。また、提案方式を搭載した実無線機を開発した。さらに、この無線機を用いてマルチホップ伝送技術により通信エリアを拡張した際の伝送距離と伝送レートについて評価した。

第二の自営通信システムとして、1.2 GHz/2.3 GHz と高い周波数帯を利用する次世代の広帯域 field pick-up unit: FPU を扱った。この FPU ではロードレースなどの超高精細映像の伝送に広帯域が必要だが、高い周波数帯を利用するため、ドップラーシフトの影響を受け、広い帯域内で周波数選択性フェージングの影響も受けやすい。それに伴い伝送品質が劣化する。劣化を軽減する無線伝送方式として、基地局と移動局にそれぞれ 4 本のアンテナを使用し、空間多重して伝送する特異値分解 (SVD) -MIMO と、伝搬環境の変化に応じて伝送パラメータを変更する適応送信制御 (ATC) の利用が提案されている。SVD-MIMO で使用するウェイト行列は、設計上回避困難な劣化が存在する。従来の ATC では理想的なウェイト行列での伝送想定に基づく ATC を適用していたため、性能が劣化していた。本論文では、劣化した伝送路品質を推定し、それに基づく ATC 方式を提案した。また、更に高品質な伝送を実現するため、劣化送信ウェイト行列を機械学習 (ML) により補償する方式を提案した。同様に ML による補償性能を簡易的に評価する指標と、学習データ作成手法についても提案した。

最後に、評価結果をもとに、自営無線通信システムを活用した各種アプリケーション用プラットフォームの展望を述べた。この展望においては、WRAN を基盤とし、様々な分野に適応可能な cyber-physical system (CPS) プラットフォームと、次世代 FPU を用いた番組制作プラットフォームをそれぞれ提案した。

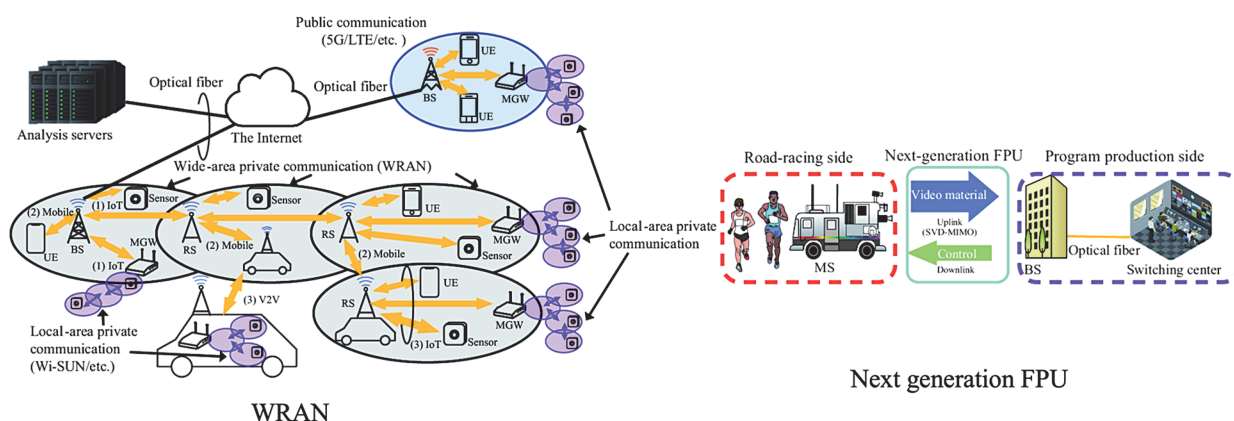


図 1 WRAN 基盤による CPS プラットフォーム

康 瑞 (大木英司 教授)

「Fault-Resilient Resource Allocation in Network Function Virtualization」

(ネットワーク仮想化における故障耐性のある資源割り当て)

令和5年9月25日授与

The thesis delves into the transformative potential of Network Function Virtualization (NFV), which fundamentally shifts the architecture of traditional networks by decoupling network functions from dedicated hardware. By virtualizing these functions into virtual network functions (VNFs), NFV allows for dynamic scaling, reduces the costs associated with hardware updates, and facilitates the creation of tailored service function chains (SFCs) for customized services.

As the complexity and volume of network functions continue to grow, manual deployment and management become increasingly challenging. The thesis underscores the necessity for automated management and deployment through NFV orchestration engines like Kubernetes, which are crucial for maintaining the robustness and efficiency of modern networks. The core objective of the research is to enhance network fault tolerance and minimize the degradation of service quality due to hardware or software failures.

The thesis presents several innovative models and approaches for optimizing VNF allocation:

- A model is developed to maximize the continuous availability of SFCs, aiming to reduce service interruptions by effectively managing node unavailability. This is approached through an Integer Linear Programming (ILP) model complemented by a heuristic algorithm that offers a balance between optimal performance and practical applicability.
- A primary and backup VNF placement model is proposed to minimize service disruptions caused by node unavailability. This model leverages backup functions that are strategically activated to maintain service continuity, enhanced by an algorithm that identifies and mitigates critical unavailability bottlenecks.
- The robust optimization model addresses the allocation of VNFs in scenarios with uncertain node availability. By designing a framework that can adapt to different levels of uncertainty, this model ensures maximum service continuity and employs heuristic algorithms to manage the complexity of large-scale network environments.
- To reduce end-to-end latency and ensure high resilience, another model is designed for the allocation of VNFs in SFCs. This model, which incorporates fault tolerance and diverse service requirements, selects suitable replicas from pools to manage various failure scenarios effectively, supported by approximate methods that reduce computational demands.
- The dynamic VNF allocation model is tailored for scenarios with randomly arriving and changing service requests. It ensures sufficient processing capabilities even in the event of multiple node failures, utilizing a reinforcement learning approach to optimize the allocation process in real time.

Furthermore, the thesis demonstrates the practical implementation of these models in Kubernetes, showcasing how the orchestration engine can enhance automatic VNF deployment and management. Custom resource controllers are introduced, improving resource utilization and responsiveness to service demands, thereby showcasing the feasibility and efficiency of the proposed solutions in real-world applications.

Overall, the thesis not only highlights NFV's capability to revolutionize network management but also provides a robust framework for tackling the complexities of modern networks. The proposed models and solutions improve resilience, flexibility, and efficiency in network services, potentially influencing future developments in network architecture and paving the way for more automated and adaptive network management systems.

朱 夢 菲 (大木英司 教授)

「Resource Allocation in Network Function Virtualization with Workload-Dependent Unavailability」

(負荷依存の不可用性を伴うネットワーク機能仮想化における資源割り当て)

令和6年5月23日授与

Network Function Virtualization (NFV) represents a significant shift in network services by moving from dedicated hardware to virtualized functionalities, thereby reducing the constraints and expenses associated with traditional systems. By enabling the pooling of computational resources, NFV enhances scalability, flexibility, and cost efficiency. It allows traditional network functions such as firewalls and load balancers to be virtualized on virtual machines and containers, highlighting the critical importance of efficient resource allocation for optimizing network performance and ensuring reliable service availability.

Effective management of these resources boosts the overall efficiency and responsiveness of network services, maintaining continuous functionality. However, challenges such as node failures and the selection of appropriate resource backup strategies complicate the reliability and continuity of services. Resource backups, including cold and hot backups, are essential for minimizing recovery times and downtime, necessitating innovative strategies to balance resource sharing, recovery speed, and overall availability.

This doctoral thesis tackles these challenges by introducing sophisticated optimization models and algorithms aimed at improving service quality. The research includes detailed numerical experiments and analysis to evaluate the effectiveness of the proposed methodologies, which consider factors like workload-dependent unavailability, recovery priorities, fault tolerance, load balancing, and the complexities of shared protection. The insights provided elucidate the potential trade-offs and performance enhancements achievable through these innovative methodologies.

The thesis outlines several key models and strategies:

- **Optimization of Resource Allocation:** It proposes a model that uses workload-dependent failure probabilities to optimize primary and single backup resource allocation, thereby minimizing the maximum expected unavailable time (MEUT). This model incorporates both hot and cold backup strategies to provide flexibility and efficiency in resource management.
- **Multiple Backup Resource Allocation:** This model extends the approach to multiple backup resources under a protection priority policy, analyzing its impact on improving MEUT and providing robust solutions against node failures.
- **Advanced Fault Tolerance and Load Balancing:** This model introduces a resource allocation strategy with preventive recovery priority to minimize unavailable probability due to multiple failures, addressing both unsuccessful recovery and maximum unavailable probability post-recovery among nodes. It enhances the recovery strategy at operation start, adapting to workload variations upon failure detection. This comprehensive model optimizes resource allocation and integrates load balancing into the recovery process, significantly boosting the system's ability to maintain service quality under stress.
- **Robust Function Deployment:** The thesis also addresses challenges associated with uncertain recovery times by developing a model that guarantees expected recovery times in a cost-efficient manner, taking into account shared protection and recovery time uncertainties.

Additionally, the thesis bridges the gap between theoretical research and practical application by implementing these models in a Kubernetes environment. It designs a custom resource and controller to effectively manage primary and backup resources, ensuring optimal resource allocation and maintenance of service continuity. This includes a two-layer controller structure that achieves prompt and optimal function deployment and management, demonstrating the practical viability and effectiveness of the proposed solutions.

In conclusion, the thesis significantly advances the field of NFV by developing sophisticated models for resource allocation that not only enhance theoretical understanding but also provide robust solutions for practical implementation, thus facilitating significant advancements in modern network management.

竹 田 健 太 (大木英司 教授)

「Lightpath Provisioning in Elastic Optical Networks」 (エラスティック光ネットワークにおける光パス設定)

令和 6 年 3 月 25 日授与

急速に増大するインターネット通信の需要を支える光ネットワークにおいて、スペクトル資源を柔軟に利用可能とするエラスティック光ネットワーク (EON: Elastic optical network) が注目されている。EON ではトラヒック需要に応じて光パスが設計され、光パス設計においてはスペクトル資源を効率的に利用することが重要である。本論文はEONにおける光パス設計に関する3つの問題について検討する。

第1に必要なスペクトル資源を最小化するための各パスに異なる数のスペクトルスロットおよび伝送容量を割り当てる Multipath provisioning (MPP) 方式を提案する。提案方式では2つの最適化問題が示される。1つは各パスの経路が事前に定められている場合の各パスに割り当てるスペクトルスロット数を決定する問題、もう1つは各パスの経路と割り当てスロット数を決める問題である。2つの最適化問題はそれぞれ整数線形計画問題 (ILP: Integer linear programming) 問題として定式化される。数値評価では提案方式は従来方式と比較して一部のケースで必要なスペクトル資源を削減することを確認する (図1)。

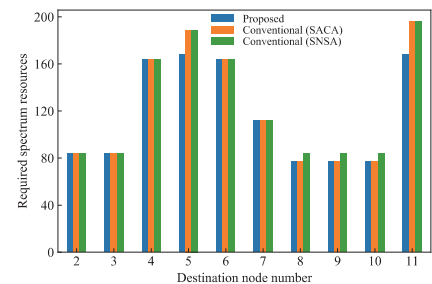


図1 MPP方式の評価

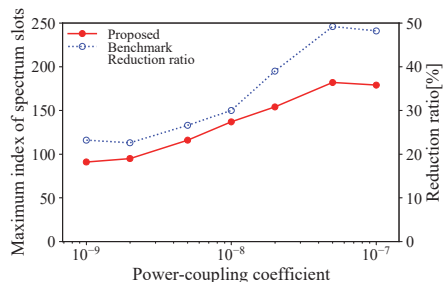


図2 コア間XTとコア内PLIを考慮したモデルの評価

第2にコア間クロストーク (XT: Crosstalk)

による光信号対雑音比 (OSNR: Optical signal to noise ratio) のペナルティを考慮することにより、空間多重型 EON においてコア間 XT とコア内 Physical layer impairments (PLI) を同時に考慮する Routing, modulation, spectrum, and core allocation (RMSCA) モデルを提案する。提案モデルでは伝送距離が短くなると XT 閾値を緩和し、伝送距離が長くなると XT 閾値を厳しく設定する。これにより提案モデルはスペクトル利用効率を向上させる。本論文では提案モデルに基づく最適化問題を示し、最適化問題は ILP 問題として定式化される。また、

ILP 問題が扱いづらい場合のため、発見的アルゴリズムを示す。数値評価により提案モデルはベンチマークモデルよりもスペクトル利用効率を向上させることを確認する (図2)。

第3に空間多重型 EON における光パスへのスペクトルスロットの割り当てに伴うフラグメンテーションとコア間 XT によるフラグメンテーションの双方を抑制するための光パス設計モデルを提案する。提案モデルではコア間 XT による断片化を抑制するために、フラグメンテーションメトリックを計算する際に、空きスペクトルスロットを使用可能なものと使用不可のものに区別する。本論文では提案モデルに基づく最適化問題を示し、最適化問題は ILP 問題として定式化される。また、ILP 問題が扱いづらい場合のため、発見的アルゴリズムを示す。数値評価により提案モデルはベンチマークモデルよりもブロッキング率を抑制することを確認する。

以上、本論文は EON の光パス設計に関する提案を行い、光ネットワークの発展に貢献するものである (図3)。

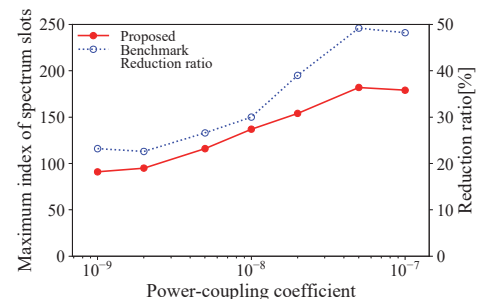


図2 フラグメンテーションを考慮したモデルの評価

大 島 國 弘 (佐藤高史 教授)

「Leakage-Current-Aware Layout Design of DNTT-Based OTFTs and Its Applications to Digital Circuits」

(DNTT を用いる有機薄膜トランジスタのリーク電流考慮レイアウト設計とそのデジタル回路への応用)

令和 6 年 3 月 25 日授与

フレキシブルセンサシステムは、低コスト、軽量、曲げ伸ばし可能といった性質により、ウェアラブルデバイスやロボティクス、ヘルスケアなどの分野で注目されている。特に、有機薄膜トランジスタ (OTFT) は低温プロセスによる製造が可能のため、紙やフィルムといった柔軟な基板上に回路を形成することができる。OTFT においては p 型が安定した動作特性と高いキャリア移動度を示し、センサ回路や論理回路の実用が期待されている。しかし、p 型有機半導体材料の中でも高い性能を示すジナフト [2,3-b:2',3'-f] チエノ [3,2-b] チオフェン (DNTT) は、リーク電流や特性のばらつきが大きいという課題が存在する。これらの課題は OTFT のオン・オフ電流比を低減し、回路動作の不安定性の原因となるため、フレキシブル OTFT 回路の実用に向けて改善が必要となる。また、実用可能なフレキシブル OTFT 回路として、センサシステム上で取得したデータの処理回路や偽造チップを防止するためのセキュリティ回路といった回路応用が望まれる。

本論文では、DNTT を利用した p 型 OTFT を対象に、リーク電流を低減可能なレイアウト設計と回路応用について、以下 3 点を検討する。

1. DNTT を利用した p 型 OTFT のリーク電流制御に向けた素子レイアウトの最適化

異なるレイアウトの OTFT を試作・測定し、特性の評価を行う。ゲートリーク電流及びソース・ドレイン間リーク電流の要因となるデバイス構造を特定し、それらを制御するためのレイアウト設計を提案する。結果として、リーク電流の抑制により高いオン・オフ電流比を実現し、OTFT 論理素子の安定性と性能向上を達成できることを示した。

2. OTFT を用いたスパイクニューラルネットワーク (SNN) 回路「flex-SNN」の設計

フレキシブルセンサシステムにおけるリアルタイムデータ処理の実現に向けて、リーク電流制御 OTFT により形成可能な SNN 回路を設計する。Flex-SNN は、フレキシブル基板上での製造を可能とするため、少数の材料層で構成される。回路シミュレーションにより、MNIST データセットを利用した分類タスクにおいて 97.0% の分類精度を得られることを確認した。

3. OTFT を用いた物理複製困難関数 (PUF) 回路の設計

OTFT は Si-MOSFET と比較して特性の劣化が速く、長期間の値保持が困難となる課題が存在した。提案 PUF 回路においては OTFT の材料に含まれる金属酸化物薄膜による抵抗変化型ランダムアクセスメモリ (ReRAM) を用いて値を保存することにより、安定して値を保存できる。提案 ReRAM を用いることにより、PUF 回路の応答は OTFT の特性劣化の影響を受けにくくなり、安定して動作することを確認した。

総じて、本論文では、DNTT を用いた p 型 OTFT のリーク電流制御可能なレイアウト設計を提案し、提案レイアウトを利用した新しい回路技術を検討した。これにより、フレキシブルセンサシステムにおける OTFT 回路の実用に向けて、データ処理やセキュリティ機能を担う回路応用の可能性を示した。

竹 内 浩 造 (橋本昌宜 教授)

「A study on heavy ion-induced single event effects for radiation-tolerant FPGA development」

(耐放射線性 FPGA に向けた重粒子誘起シングルイベント効果の研究)

令和 6 年 9 月 24 日授与

トランジスタの小型化と製造プロセスの進展により、かつてのスーパーコンピュータに必要であった処理能力は、今ではスマートフォンで利用可能となっている。半導体が文字通りあらゆる場所に存在する現在、その信頼性は、社会インフラとしてこれまで以上に重要になっている。地上、宇宙を問わず、半導体は、放射線によってトランジスタにチャージが付与される「シングルイベント効果 (SEE)」または「ソフトエラー」にさらされる。トランジスタが小型化し、低電圧で動作するようになるにつれ、スタティックランダムアクセスメモリ (SRAM) やフリップフロップ (FF) といったメモリセルの放射線感受性は増加している。さらに、平面構造から三次元 (3D) のトランジスタ構造への移行により、これらの影響はより複雑なものとなっている。このため、SEE の研究とその特性評価は、SEE を理解し、信頼性を向上させる上で不可欠である。

本論文では、主にプログラマブルロジック (PL) と SRAM で構成されるフィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA) における SEE とソフトエラーに焦点を当てる。FPGA は再構成可能で、高い並列処理能力、短いターンアラウンドタイムにより、地上での人工知能 (AI) アクセラレータを含むアプリケーションや、衛星システムで広く使用されている。

FPGA のコンフィグレーション RAM (CRAM) は、PL の接続や論理を格納し特定の機能を提供する。CRAM におけるシングルイベントアップセット (SEU) は、FPGA の機能の中断や誤動作を引き起こす。FPGA 中の SRAM はブロック RAM (BRAM) と呼ばれ、高密度のグリッド状に配置され、FPGA 内でデータを格納する。SRAM は常にシングルビットアップセット (SBU) やマルチセルアップセット (MCU) の影響を受け、これらは隣接セルとの複雑なチャージ収集メカニズムを特徴づける重要な指標である。本論文では、FPGA の CRAM と BRAM、および放射線下でのそれらの現象を調査し、FPGA の信頼性について議論する。

本論文の研究では、CRAM における SEU、PL におけるシングルイベントトランジェント (SET)、および BRAM に使用される SRAM の SBU と MCU のチャージ収集メカニズムを取り上げる。まず、不揮発性素子技術の一つである原子スイッチ (AS) FPGA の SEU 耐性を調査し、重イオン照射下で状態変化に対する耐性を明らかにした。次に、パルスレーザー照射を用いた周辺回路における SET の調査を行った。

その後、SRAM の SBU と MCU を、異なるデータパターンや印加電圧下での重イオン照射を用いて調査し、イベント毎のビットマップを分析しシミュレーションを行うことで、3D トランジスタにおける特徴的なチャージ収集メカニズムを明らかにした。また、SRAM の電圧依存性を議論し、先行研究で提案されたモデルの予測に反することを示した。これらの結果に基づき、バルク SRAM の SEU 断面積 (XS) モデルを提案し、検証した。

本論文は、FPGA の信頼性の理解と向上に貢献するとともに、提案モデルが地上および宇宙のアプリケーションにおいて重要となる陽子および中性子の XS の予測への応用の可能性も示した。

程 全 (橋本昌宜 教授)

「Design and Reliability Analysis of System-on-Chips for Artificial Intelligence Applications at the Edge」

(エッジ人工知能アプリケーション向けのシステムオンチップの設計と信頼性解析)

令和6年9月24日授与

The field of Artificial Intelligence (AI) has advanced significantly, but the reliance on cloud-based solutions presents challenges like high latency and bandwidth requirements. Edge AI computing addresses these issues by enabling local data processing. However, Neural Networks (NNs) with millions of weights and activations demand substantial computational resources, memory, and hardware overhead. On-chip memories, essential for these applications, are particularly vulnerable to radiation-induced soft errors, leading to data corruption and reliability concerns. This is critical for safety-critical applications such as autonomous vehicles, medical devices, and industrial systems, where high reliability and computational efficiency are imperative.

This dissertation focuses on energy-efficient, reliable AI System-on-Chips (SoCs) for edge applications. By leveraging approximate computing, mixed-precision (MP) methods, and Neural Architecture Search (NAS), the work optimizes performance, reduces memory footprint, and minimizes hardware resource consumption. Approximate Multiply-and-Accumulate (MAC) operations and systolic data flow enhance computational efficiency, while near-memory computing (NMC) addresses the limitations of traditional architectures. Reliability challenges are tackled by analyzing soft error impacts on NNs, emphasizing that not all errors are catastrophic due to the fault-tolerance of weights and activations. Comprehensive fault injection (FI) and radiation experiments offer insights into error detection and mitigation. The dissertation introduces three AI accelerators targeting convolution, pooling, and transformer operations. A multi-bit-width (MBW) Booth accelerator supports INT2/4/8 computations, achieving significant power efficiency improvements on FPGA and ASIC platforms. A sparse accelerator optimizes performance by leveraging NN sparsity, and a Booth-value-confined MP accelerator with NMC-friendly data flow enhances energy efficiency. These accelerators are integrated into SoCs, including a high-performance FPGA-based SoC, a 22nm edge AI ASIC, and a multi-core multi-mode SoC with dual-core lock-step (DCLS) for fault tolerance. The designs achieve power efficiency up to 29.11 TOPS/W and support versatile computations with integrated debugging features. Meanwhile, reliability assessments highlight vulnerabilities, such as the susceptibility of control and status registers (CSRs) and Instruction/Data Tightly Coupled Memory (I/DTCM) to soft errors, particularly in low-precision INT2/4 layers. While weights and activations show minimal impact on system failures, misclassification errors increase with reduced precision. Radiation and FI experiments confirm the importance of error-resilient designs, emphasizing the need for mitigation strategies in safety-critical applications.

Overall, this dissertation aims to achieve energy-efficient AI SoC designs with necessary and sufficient reliability consideration, providing valuable insights for designing reliable and energy-efficient hardware at the edge.

片山 梨沙 (石井信 教授)

「Computational Modelling and Neural Mechanisms of Hierarchical Inference and Decision-making in Partially-observable Environments」

(部分観測環境における階層的推論・意思決定過程のモデル化とその神経基盤に関する研究)

令和6年9月24日授与

近年、ヒトや動物を用いた脳活動計測実験により、意思決定に関与する複数のモジュールが脳内で階層性をなしつつ協調的・競合的に作用し、その統合的出力として行動が決定されていることが示唆されている。ヒトを模した階層的情報処理機構は、人工知能への応用展開を目指して機械学習分野でも研究が行われている。しかし、情報工学・神経科学分野ともに、従来研究の多くは比較的単純な実験タスクとフラットな計算モデルを用いたものであり、ヒトが実世界で直面するような複雑かつ不確実な環境における階層的情報処理機構や、その処理過程における内省的情報（メタ認知）の影響は明らかになっていない。本研究は、従来のシンプルな部分観測問題（POMDP）を拡張した階層的推論課題および階層的意思決定課題と対応する計算モデルを考案し、行動計測とfMRIによる脳活動計測によって、ヒト脳内の階層構造的な複数モジュールが構成する意思決定の神経メカニズムを解明しようとしたものである。具体的には、以下の研究成果を得ている。

1. 部分観測環境における予測の脳内表象と主観的確信度との関連

ベイズ脳仮説においては、信念から生成される仮想的な予測が、不確実環境での信念更新の要となる。しかし、従来研究では、予測が脳活動パターンに符号化されていることは完全観測環境下で示されているにすぎず、不確実環境においては検証されていなかった。本研究では、部分観測迷路探索課題とfMRIによる脳活動計測を用いて、不確実な位置推定に基づくシーン予測が頭頂・前頭ネットワークの脳活動パターンから解釈可能であり、予測の脳活動パターンへの符号化の明瞭性が不確実性に依存して異なることを示した。また、頭頂葉の異なる領域が階層的に空間的予測に関与している可能性を示唆した。

2. 階層的POMDP問題における信念の不確実性に関与する脳領域の特定

前項で用いた部分観測迷路課題では、信念更新に利用される外界情報（シーン）自体は完全観測であった。しかし実世界においては、我々の観測可能な情報は、限定的な処理能力のために常になんらかの不確実性を内包する。これに対し本研究では、古典的POMDPの一つであるTiger problemを組み込んだ新しい部分観測迷路課題を考案し、この課題実行中のヒト脳内での情報処理過程が、2種類の隠れ状態が各々の信念形成・更新にもう一方を利用する階層的推論モデルにより再現できることを示した。また、この階層的推論過程における複数の隠れ状態推論の不確実性が、前頭前野内側部に表象されていることを示した。

3. 階層的意思決定過程におけるメタ認知修飾の神経基盤の特定

実世界の意思決定においては、環境に対する知識など、観測から信念を形成するために必要な事前情報にもしばしば不確実性が内包されている。こうした階層的な不確実性を処理する意思決定過程や階層間でのメタ認知の相互作用に関与する脳神経基盤は明らかになっていない。本研究では、環境に対する状態推論を組み込んだバンディット課題を用いて、上位階層の不確実性が下位階層の推定・意思決定およびそのメタ認知を修飾する脳内情報処理過程を計算モデル化し、このプロセスを内側前頭前野-島皮質間ネットワークが担っていることを示した。さらに、行動レベルの個人間差異が、このネットワークを構成する脳領域間の機能的結合の強さによって説明できることを発見した。

まとめると、本論文は、不確実環境における階層的情報処理および関連するメタ認知過程を計算論モデル化し、これを実装する脳神経メカニズムを示した。内省を含む階層的情報処理は、近年注目を集める自己意識の神経機序解明の端緒ともなり得、人間科学・神経科学・情報工学のみならず、精神疾患等に見られるメタ認知異常・意識障害の病態解明や臨床応用にも貢献する。

岩 田 晃 拓 (門信一郎 准教授)

ヘリオトロンJにおける近赤外領域の分光診断に関する研究

令和6年3月25日授与

エネルギー問題、環境問題の解決方法の一つとして期待される磁場閉じ込め核融合炉の実現に向けたプラズマ研究が行われており、プラズマ性能の向上に伴い装置も大型化し、光ファイバーによる紫外・近紫外光の伝送効率低下や多価イオン輝線同士の混濁などが懸念されている。それに対し近赤外領域は、重元素不純物輝線による混濁が少なく、熱運動によるスペクトル広がりに対するゼーマン効果やシュタルク効果によるスペクトル分裂が広い利点を持つ。本論文は、従来核融合プラズマ実験装置への適用例が少なかった近赤外領域の分光診断手法を真空容器内の高温輝点（ホットスポット）の温度計測や固体水素ペレット溶発雲の電子密度・温度の計測に適用し、中型規模ヘリカル装置であるヘリオトロンJ装置において、高エネルギー電子が容器壁に及ぼす影響や、ペレット溶発における原子素過程について詳細に調べたものである。

本論文で得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 近赤外領域の黒体輻射連続スペクトルを用いて、特定条件において可視光で観測されていたホットスポットの表面温度の最高温度が約 2000 K になることを示した [1]。
- (2) 近赤外分光器の2次回折光と真空容器の反射によるスペクトル計測への影響を評価し、補正する手法を提案した。
- (3) 可視光の発光計測と近赤外分光計測を組み合わせ、可視光の発光強度を温度に較正することで、ホットスポット温度の高速な時間変化の検出を可能にした。
- (4) 固体水素ペレット溶発雲の発する近赤外領域の水素原子パッシュェン α 線のシュタルク広がりを測定することでペレット溶発雲の電子密度計測を低密度側 (10^{21} m^{-3} 程度) へ拡張することに成功し、近赤外分光が中型装置において有用な手法であることを示した [2]。
- (5) 低分散分光器でシュタルク幅と同時測定可能なパッシュェン系列 ($\text{Pa}_\alpha, \text{Pa}_\beta, \text{Pa}_\gamma$) の輝線強度比に CR モデルを適用することで、ペレット溶発雲の電子温度 (約 0.9 eV) 測定に成功し、その励起準位占有密度が LTE 状態にあること、その温度領域において (4) のシュタルク分光結果への電子温度の影響が小さいことを証明した [3]。

これらの成果 (1) (2) (3) は、装置保護の観点から重要であり、加熱パワーの増大に従いますます重要になってくる。また成果 (4) (5) は加熱パワーが比較的弱い、他の中規模装置におけるペレット溶発過程や、燃料供給の物理研究へも適用可能であり、核融合級の大型装置との比較やスケールアップ研究に重要な寄与ができる可能性がある。さらに、分光器や検出器の高性能化によって、今後、高速化やイメージングの可能性を有するものである。

[1] S. Kado, A. Iwata, T. Kanazawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 89, 10D129 (2018).

[2] A. Iwata, S. Kado, M. Murakumo *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 93, 113537 (2022).

[3] A. Iwata, S. Kado, G. Motojima *et al.*, Plasma and Fusion Research 19, 1402017 (2024).

Kim Heejun (松田一成 教授)

「Exploring the Optical Properties of Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides Moiré Superlattice」

(二次元遷移金属ダイカルコゲナイドのモアレ超格子の光学特性の探索)

令和6年5月23日授与

近年、次世代の光・電子デバイス応用に向けわずか原子数層からなる極めて薄い、半導体二次元物質に関する研究が盛んに行われている。特に、それら半導体二次元物質を重ねて作製した人工ヘテロ構造やその界面においては、新たな物性や機能発現の舞台となっている。本研究では、単層遷移金属ダイカルコゲナイドなど半導体二次元物質からなる人工ヘテロ構造において特異的に発現する光学的性質や、そのデバイス応用に深く関与する電子正孔対であるモアレ励起子に関する研究について調べた。これまでその詳細が明らかとなっていなかった、アモレ励起子状態やそのダイナミクス、さらにはモアレ励起子が関与した光学特性に関して、本研究を通して以下のような多くの知見が得られた。

1) 単層 MoSe₂ (二セレン化モリブデン) / WSe₂ (二セレン化タングステン) ヘテロ構造を作製し、モアレ励起子に起因する光学特性を定常・時間分解発光測定によって調べた。その結果、温度上昇に伴ってモアレ励起子からの発光強度が急激に低下することなどの実験結果とレート方程式による解析から、発光に寄与するブライト励起子の数 meV 上に、ダーク励起子状態が存在することを見出した。さらにモアレ励起子ダイナミクスには、フォノンが関与した散乱プロセスが重要な役割を果たしていることを明らかにした [1]。

2) ゲート電圧制御が可能な MoSe₂/WSe₂ ヘテロ構造デバイスに対して、Ga イオンビーム加工を施し、光学的に観測するモアレポテンシャルの数を制限する新たなアプローチを提案した。これにより従来困難であった、わずか数個の少数のモアレ励起子やモアレ荷電励起子からの発光スペクトルを得ることに成功した。さらに、その温度依存性や円偏光分解発光測定によりモアレ荷電励起子において、温度に依存せず安定かつ数 100 ナノ秒にも及ぶ極めて長いバレー緩和現象の観測に成功した [2]。

3) さらに単層 MoSe₂/WSe₂ ヘテロ構造において、MoSe₂ と WSe₂ 間に *h*-BN (窒化ホウ素) スペーサーを導入することにより、モアレポテンシャルを変調しモアレ励起子の次元性を制御する新しい方法を提案した。スペーサー層の有無によって、発光エネルギーの位置や発光強度の温度依存性が明確に変化し、その振る舞いがゼロ次元的なモアレ励起子から、二次元的な層間自由励起子へと変化していることを明らかにした [3]。

以上のようにここで得られた知見は、モアレ物理などの新たな物性創発の観点での基礎科学的意義とともに、モアレ励起子を利用した量子科学・技術への応用の基礎となるなど、工学的に重要であると考えられる。

- [1] H. Kim, K. Aino, K. Shinokita, W. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, Dynamics of Moiré Exciton in a Twisted MoSe₂/WSe₂ Heterobilayer, *Adv. Opt. Mater.* **11**, 2300146 (2023).
- [2] H. Kim, D. Dong, Y. Okamura, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, Dynamics of Moiré Trion and Its Valley Polarization in a Microfabricated WSe₂/MoSe₂ Heterobilayer, *ACS Nano* **17**, 13715 (2023).
- [3] H. Kim, H. Wang, Y. Wang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Konabe, and K. Matsuda, Identification of Two-dimensional Interlayer Excitons and Their Valley Polarization in MoSe₂/WSe₂ Heterostructure with *h*-BN Spacer Layer, *ACS Nano in press*. doi.org/10.1021/acsnano.4c05963

滝 朋 恵 (小嶋浩嗣 教授)

「Study on the plasma waves observed by single spacecraft interferometry in the terrestrial inner magnetosphere」

(地球内部磁気圏において単一衛星による干渉法で観測されたプラズマ波動に関する研究)

令和 6 年 9 月 24 日授与

本論文は、地球内部磁気圏を探索している「あらせ衛星」に搭載された 2 本のモノポール電界センサーを用いた干渉法 (interferometry) による観測・解析手法、および、その手法を異なるプラズマ波動現象に適用して得られた観測結果とその考察についてまとめた。科学衛星に搭載されるプラズマ波動観測器は、プラズマ波動の電界成分を捉えるためにダイポールの電界センサーを用いることが一般的であるが、本論文ではそのダイポールセンサーを構成する 2 本のエレメントをモノポールセンサー 2 本として用いることにより、プラズマ波動の空間的な位相差とその時間変化を捉えることに焦点をあてている。これは単一衛星干渉法による観測であり、そこからプラズマ波動の波面やその移動速度 (位相速度) を求めることができる。本論文の主な成果は次の通りである。

1. 干渉計を用いて静電孤立波を観測し、二本のモノポールセンサーで観測された電界波形から観測時間差を計算した。そして、対応する静電孤立ポテンシャルの空間スケールを数 100m から数 km 程度と導出した。更に、静電孤立波の波形の特徴から内部磁気圏に存在する静電孤立ポテンシャルが二次元の Gaussian 構造をもつことを示した。
2. プラズマ波動のなかでも電磁波であるホイッスラーモードコーラス波動に対し、干渉法を適用して、その波面の特定を行った。衛星のスピンも利用して、波長が電界センサーに対して非常に長く、位相速度が高速な電磁波に対して、単一衛星で行う干渉法の制約を明らかにした。
3. 波長が短く、位相速度も電磁波に対して非常に遅い静電波である電子サイクロトロン高調波に焦点をあてた。干渉計で得られる位相差が、衛星のスピンの依存性を示し (図 1)、観測モデルを構築した。そして、あらせ衛星の干渉法が、正確に電子クロトン高調波の位相を捉えていることを示した。
4. 電子サイクロトロン高調波の観測モデルを用いて、電子サイクロトロン高調波の波数ベクトルの成分を推定する手法を提案した。そして、この手法によって推定した波数ベクトルを用いて位相速度を算出した。また、干渉法より観測された電子サイクロトロン高調波の位相速度と分散関係から、低エネルギー電子の温度を推定することに成功した。

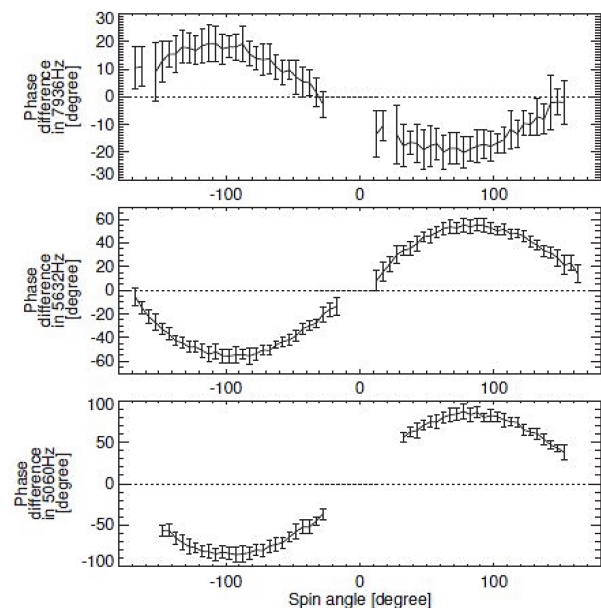


図 1：電子サイクロトロン高調波に対する 2 本のモノポールアンテナによる干渉法によって得られた位相差の衛星スピン変化 (上から 7936Hz、5632Hz、5060Hz)。

張 天 (海老原祐輔 教授)

「Study on Impacts of Geomagnetic Disturbances on Power Systems」

(地磁気擾乱による電力系統への影響に関する研究)

令和6年9月24日授与

Geomagnetic disturbances with respect to solar variations induce electric currents, flowing in artificial long-length electric conductors, such as power lines and pipelines. This current is called geomagnetically induced current (GIC). The GIC has a very low frequency, which can cause power failures in the power systems due to direct current (DC) bias. This paper summarizes findings on the impact of geomagnetic disturbances on power systems, obtained by using observations and simulations of geomagnetic and geoelectric fields in response to different geomagnetic activities. The main results are as follows:

1. Using the geoelectric field measured at the Kakioka Geomagnetic Observatory as a proxy for GIC, we clarified the relationship between geomagnetic disturbances and the geoelectric field variations for the three main types of geomagnetic activities in Japan: sudden commencements (SCs), geomagnetic storms, and bay disturbances. We showed that the maximum amplitude of the geoelectric field is largest during SC, followed by geomagnetic storms and bay disturbances, and that there is a linear relationship between the maximum amplitude of geomagnetic disturbances and the maximum amplitude of the geoelectric field variations, and derived the proportionality constant. We performed extreme value analysis using the generalized extreme value distribution (GEVD) method to obtain the maximum amplitude of the geoelectric field over a 10-year return period and a 100-year period.
2. Based on global magnetohydrodynamic (MHD) simulations, we succeeded in reproducing the geomagnetic disturbances that occurred in Canada in March 1989 when a widespread blackout caused by GIC occurred. It was shown that the arrival of an interplanetary shock wave caused the SC, which in turn caused a strong current called the main impulse (MI) current to flow in the ionosphere, significantly disrupting the geomagnetic field and causing a widespread blackout in Canada. A global map of geomagnetic disturbances was created in response to different solar wind conditions to indicate areas with a high impact of GICs on the power grid. It is expected that this will be used as a hazard map for evaluating GIC level in power systems.
3. Following up our previous simulations, we succeeded in identifying the cause of the field-aligned currents (FACs) that increase with SCs and the region in which they are generated. We showed the details of the entire physical process from the interplanetary shock wave compressing the magnetosphere, to the FACs generated in the magnetosphere connecting with the ionosphere to strengthen the ionospheric currents and disrupting the magnetic field on the ground, which clarified the fundamental cause of the widespread blackout that occurred in Canada in March 1989.

The study clarified the characteristics of geoelectric field variations in Japan, as well as the generation process of the ionospheric currents that flow in high-latitude regions due to SCs and the field-aligned currents. It also derived an equation that relates geomagnetic disturbances and the geoelectric field variations, and presented a global map of geomagnetic disturbances of SCs. This is important knowledge from the perspective of protecting power equipment, which is expected to be useful for power companies in evaluation of GIC risk in power systems.

河 合 勝 己 (篠原真毅 教授)

「Novel Rectenna Design Methods for Wireless Power Transfer Systems」

(無線電力伝送システムに向けた新しいレクテナ設計手法に関する研究)

令和 6 年 9 月 24 日授与

本論文は空間伝送型無線電力伝送における高効率レクテナ及び2次高調波再放射レクテナの設計手法についてまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. レクテナではアンテナと整流回路のインピーダンス整合が重要となる。一方で整合回路は挿入損失を持ち整流効率を低下させる。本論文では、シングルシャント型整流回路の出力フィルタでインピーダンス整合と高調波処理の両方を行う新しい回路構造を提案した。提案構造の適用可能なダイオードインピーダンス範囲を明らかにした。提案した回路によって回路損失が低下し、整流効率が向上することを示した。提案構造を利用して製作し920MHz帯シングルシャント型整流回路は920MHz帯における世界最高整流効率91%を達成した(図1、図2)。
2. アンテナで高調波処理を行うことで、整合回路を必要とせずアンテナと整流回路を直結する新たなシングルシリーズレクテナを提案した。提案したレクテナの設計手法として、高調波を含むソースプルシミュレーションを新たに導入した。理想回路シミュレーションによって、アンテナで高調波処理を行うシングルダイオードレクテナにおいても理想効率100%の全波整流が可能であることを示した。高調波を含むソースプルシミュレーションによって、ソースインピーダンスと整流効率の関係をスミスチャート上にプロットしたコンター図によって示した(図3)。提案構造でシングルシリーズレクテナを作成し、高調波処理をアンテナで行う提案レクテナは高調波処理を行わない場合よりも高い整流効率を有することを示した。
3. 2次高調波を再放射可能なシングルシリーズレクテナの高調波を含むソースプルシミュレーションを用いた設計方法を示した。ソースプルシミュレーションによって、これまで示されなかった整流効率と2次高調波再放射レベルのトレードオフ関係をスミスチャート上にプロットしたコンターで視覚的に明らかにした。提案した設計手法によって、ダイオードの総合電力変換効率を損なわずに整流効率の一部を2次高調波再放射に割り当てられることを示した。

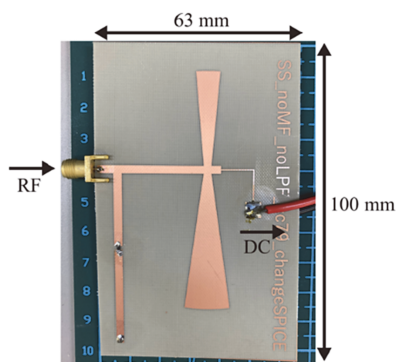


図 1 : 開発した 920MHz 帯レクテナ

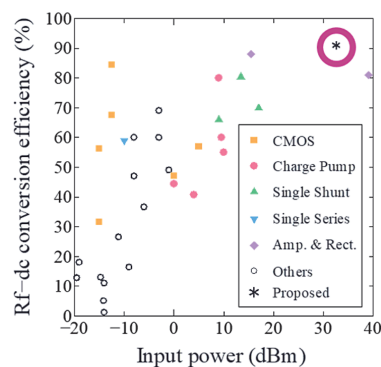


図 2 : レクテナの性能比較

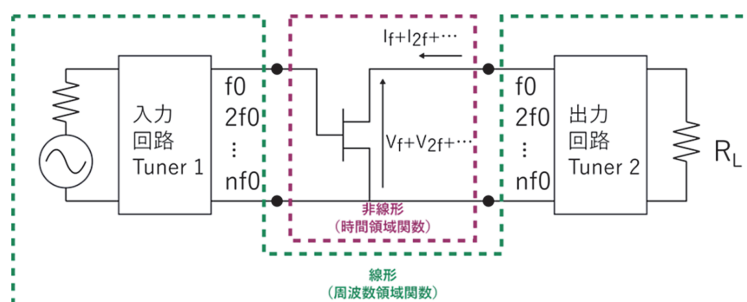


図 3 : 提案するレクテナのソースプル設計

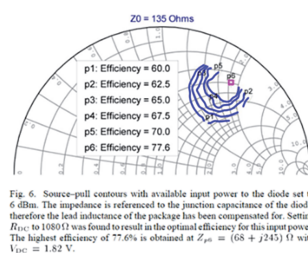


Fig. 6. Source-pull contours with available input power to the diode set to 6 dBm. The impedance is referenced to the junction capacitance of the diode, therefore the lead inductance of the package has been compensated for. Setting R_{in} to 1080 Ω was found to result in the optimal efficiency for this input power. The highest efficiency of 77.6% is obtained at $Z_{in} = (68 + j243) \Omega$ with $V_{in} \approx 1.82$ V.

中 本 成 洋（篠原真毅 教授）

「Novel Architectures and an Efficient Calibration Technique for Low-cost and High-performance Phased Array Antennas」

（フェーズドアレーアンテナの低コスト化と高性能化に向けた新技術の開発）

令和6年9月24日授与

本論文はフェーズドアレーアンテナの低コスト化・高性能化のための要素技術に関する研究開発をまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 低コストなフェーズドアレーアンテナであるパッシブフェーズドアレー方式において、従来課題であった効率の改善と柔軟なビーム形成機能の両立を実現する方式として、ラジアルライン給電アレーの各アンテナ素子を小型モーターにより回転させる新たな方式のアンテナを提案した(図1)。さらに、その設計のためアレー等価回路モデルと電磁界解析とを組み合わせた実用的な設計手法を新たに考案した。提案アンテナによれば、従来のアクティブフェーズドアレーに比べて大幅な低コスト化が可能なことを示し、試作評価において、柔軟なビーム形成が可能であるとともに、77%の高効率特性を実現することを確認し、提案アンテナと設計手法の実現性、有効性を示した。
2. DBF アンテナの低コスト化技術として、PIN ダイオードを実装したスロットペアを複数配列し、これを拡散符号に基づき制御することで、信号の符号分割多重化を実現する導波管スロットアレーによるパスシェアリング構造 DBF アンテナを提案した。また、理論解析により、提案アンテナの動作原理と信号対雑音比を示すとともに、PIN ダイオード等の電気特性誤差の影響とその改善策について明らかにした。提案アンテナによれば、従来の DBF アンテナに比べて大幅な低コスト化が可能であり、また、8 信号多重を想定した試作評価と、測定値に基づく到来方向推定のシミュレーション評価によって、提案アンテナによる DBF 機能の実現性を示した。
3. 2 点給電円形パッチをアンテナ素子とした円偏波フェーズドアレーアンテナの低軸比化を実現する効率的なキャリブレーション手法を提案した。提案手法は、円形パッチの放射特性を表す円筒波関数を基底関数とする近似関数に基づいており、導出した近似関数を用いてキャリブレーションに必要な制御量を決定する設計式を提案した。提案手法によれば、従来必要であった全偏波測定が不要となり、キャリブレーションに必要な測定数を 1/2 以下に削減可能であり、また、実機評価において、提案手法により軸比が 5.8 dB から 1.9 dB に改善可能なことを確認し、その有効性を示した。

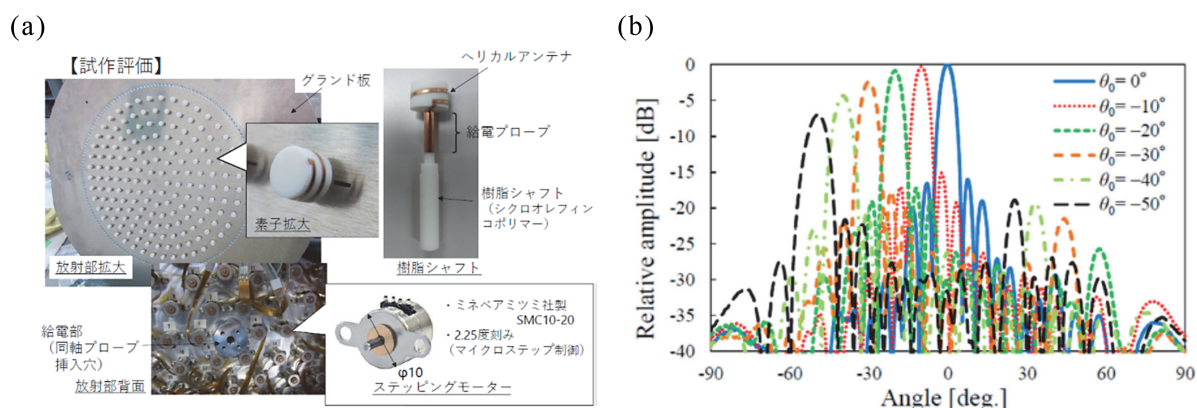


図1：開発したラジアルラインと小型モーターを利用した、高効率でフレキシブルなビーム形成が可能なパッシブフェーズドアレー (a) 試作アレー (b) 測定したビームパターン